

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Y
UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS



**MASTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

PROYECTO DE FIN DE MASTER

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE TRUCHA
COMÚN (*Salmo trutta*), BOGA DEL TAJO
(*Pseudochondrostoma polylepis*) Y BARBO COMÚN
(*Luciobarbus bocagei*) EN UNA ESCALA DE PECES
DE HENDIDURA VERTICAL**

**AUTOR:
Miriam Castillo Blanco**

**DIRECTORES:
Dr. Felipe Morcillo Alonso (CEDEX)
Dra. Irene de Bustamante Gil (UAH)**

Alcalá de Henares, 15 de Junio de 2012

D. Felipe Morcillo Alonso, investigador I+D+I en el CEDEX, como tutor del proyecto de fin de master titulado: **“Estudio del comportamiento de trucha común (*Salmo trutta*), boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*) y barbo común (*Luciobarbus bocagei*) en una escala de peces de hendidura vertical”** doy mi **Visto Bueno** a la presentación y la lectura de la memoria del proyecto en la convocatoria de Junio de 2012

Fdo.: Felipe Morcillo

Dña. Irene de Bustamante Gil, profesora titular de Geodinámica Externa, como cotutora del proyecto de fin de master titulado: **“Estudio del comportamiento de trucha común (*Salmo trutta*), boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*) y barbo común (*Luciobarbus bocagei*) en una escala de peces de hendidura vertical”** doy mi **Visto Bueno** a la presentación y la lectura de la memoria del proyecto en la convocatoria de Junio de 2012

Fdo.: Irene de Bustamante

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar mis agradecimientos a los siguientes organismos gracias a los cuales disfruto de mi actual beca, y a los organismos financiadores del proyecto de investigación del que surge el presente estudio: Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) del CEDEX, Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

También quiero mostrar mis agradecimientos a Felipe Morcillo Alonso, a Enrique Aramburu Godínez y a Juan Antonio Berges Acedo, sin cuya dedicación, este trabajo no habría podido salir adelante. A Ángel Gómez, a Omar Mariani y a Samuel Arias, por su inestimable ayuda durante todo el proceso de los ensayos, a José Luis García, encargado de la instrumentación de la escala de peces, a Jorge Rubén Sánchez y Andrés Mellado por sus aportaciones estadísticas en este artículo, a Fernando Torrent, Director de la Piscifactoría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, a Victoriano Hernández, personal técnico de la Piscifactoría, a Francisco Ramón Andrés, a Alba González y a Isabel León por su colaboración en la edición del documento, a Ángel Lara Domínguez, Director del proyecto en el que se enmarca el estudio actual y a Luis Balairón Pérez, Director del Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos.

Además me gustaría agradecer a la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Comunidades de Castilla la Mancha el habernos proporcionado los ejemplares de trucha común. Del mismo modo se agradece a la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid la autorización para la obtención de ejemplares de barbo común en aguas del río Cofío.

ÍNDICE

1.	Resumen.....	1
2.	Introducción.....	2
3.	Metodología.....	5
	3.1. Escala de peces	5
	3.2. Procedencia de los ejemplares	7
	3.3. Identificación y seguimiento de los peces	8
	3.4. Protocolo de ensayos.....	9
	3.5. Análisis del comportamiento de los peces mediante imágenes de vídeo	10
	3.6. Estadística	12
4.	Resultados.....	14
	4.1. Registros por la primera antena	14
	4.2. Ascensos completos por la escala	14
	4.3. Longitud furcal de los individuos más pequeños que ascendieron la escala...14	
	4.4. Horas de los primeros registros por la primera antena, de inicio y de finalización de la ascensión	15
	4.5. Tiempo que han tardado los peces en registrarse por la primera antena	15
	4.6. Tiempo que tardaron los peces en los ascensos completos de la escala	17
	4.7. Correlación longitud furcal-tiempo de registro por la primera antena y tiempo de ascensión	18
	4.8. Análisis del comportamiento durante el ascenso desde un estanque al inmediatamente superior	18
	4.8.1. Boga del Tajo	19
	4.8.2. Barbo común	20
	4.8.3. Comparación entre ambas especies	21
5.	Discusión.....	22
6.	Conclusiones.....	26

7. Bibliografía	28
8. Anexos	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo físico de la escala de peces en el Laboratorio de Hidráulica del CEH	5
Figura 2. Plano del modelo físico de la escala de peces. Vista lateral y planta,.....	6
Figura 3. Fotografía de la escala de peces en funcionamiento.....	6
Figura 4. Campos de velocidades y patrones de flujo en cada estanque de la escala.....	7
Figura 5. Inserción de PIT tag de 11 mm en una trucha común anestesiada.....	8
Figura 6. Esquema de la localización de las dos antenas en la escala con sus respectivos lectores y su interacción con los PIT tags implantados en los peces	9
Figura 7. Esquema aproximado de peces ascendiendo al siguiente estanque desde la zona de recirculación pequeña (ZRP) y desde la zona de recirculación grande (ZRG) respectivamente.....	11
Figura 8. Imagen obtenida por una videocámara sumergida. Se ha realizado una representación de las dos zonas de recirculación, de los dos deflectores (grande y pequeño) y de la altura a la que puede pasar un pez por la hendidura (superficie, medio y fondo).....	12
Figura 9. Tiempo medio (en segundos, s) en registrarse los peces por la primera antena.....	16
Figura 10. Tiempo (en segundos, s) que tardan los peces en ascender la totalidad de la escala. Se representan cuartiles, rangos y valores atípicos.....	17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de ejemplares de las tres especies que participaron en los ensayos con 100 l/s y 250 l/s y media de la longitud furcal (rango entre paréntesis) en cm.....	10
Tabla 2. Porcentaje de individuos de las tres especies registrados por la primera antena y frecuencia y porcentaje de individuos que han completado la ascensión	14
Tabla 3. Hora media y desviación típica de registro por la primera antena, de inicio de la ascensión y finalización de la ascensión para las tres especies (*P < 0,05).....	15
Tabla 4. Tiempo (en segundos) que tardan en ser detectados por la primera antena y longitudes furcales (LF) de las tres especies (N: número de individuos, x: media, Me: mediana, Máx: Rango superior y Mín: Rango inferior).....	16
Tabla 5. Tiempo (en segundos) que tardan en realizar los ascensos completos y longitudes furcales (LF) de las tres especies (N: número de individuos, x: media, Me: mediana, Máx: Rango superior y Mín: Rango inferior). (*P<0,05).....	17
Tabla 6. Correlación de Spearman (r) ente la longitud furcal (en cm) de los ejemplares que participan en los ensayos con los dos caudales y las variables tiempo de registro por la primera antena (en segundos, s) y tiempo de ascensión completa de la escala (en segundos, s). N es el número de individuos que se registraron por la primera antena o que realizaron la ascensión completa (*P < 0,05).....	18
Tabla 7. Frecuencias de subida en los ensayos de boga del Tajo respecto a: desde dónde pasan (zona de recirculación pequeña (ZRP) o zona de recirculación grande (ZRG)), altura de paso (fondo, medio o superficie) y cercanía a deflectores en el paso (cercanía al deflector pequeño (DP), cercanía al deflector grande (DG) o por el centro). Porcentajes entre paréntesis.	
* Diferencias significativas (P<0,05) entre frecuencias observadas y esperadas para una misma variable.+ Dependencia entre la variable señalada y el caudal.	19

Tabla 8. Frecuencias de subida en los ensayos de boga del Tajo respecto a: desde dónde pasan (zona de recirculación pequeña (ZRP) o zona de recirculación grande (ZRG)), altura de paso (fondo, medio o superficie) y cercanía a deflectores en el paso (cercanía al deflector pequeño (DP), cercanía al deflector grande (DG) o por el centro). Porcentajes entre paréntesis.

* Diferencias significativas $P < 0,05$ entre frecuencias observadas y esperadas para una misma variable. + Dependencia entre la variable señalada y el caudal.....**20**

INDICE DE ABREVIATURAS

CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

CEH: Centro de Estudios Hidrográficos

DG: Deflector Grande

DP: Deflector Pequeño

GLM: General Linear Model

PIT: Transpondedores Integrados Pasivos

SPSS: Statistical Package for the Social Sciences

ZRG: Zona de Recirculación Grande

ZRP: Zona de Recirculación Pequeña

1. RESUMEN

La experimentación que se detalla en este proyecto se ha llevado a cabo en un modelo físico de escala para peces de hendidura vertical (escala 1:1) en el Laboratorio de Hidráulica del CEDEX. Las tres especies estudiadas han sido: trucha común (*Salmo trutta*), barbo común (*Luciobarbus bocagei*) y boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*). La localización, identificación y comportamiento de los peces durante la experimentación se ha evaluado gracias a un sistema de radiofrecuencia que aplica la tecnología de los *PIT tag* y al uso de cuatro cámaras subacuáticas. Se han realizado dos ensayos con dos caudales distintos (100 l/s y 250 l/s) para cada especie. Se han obtenido estos resultados: El porcentaje de individuos de trucha común que ascendieron completamente la escala (90% para 100 l/s y 67% para 250 l/s) ha sido mayor que el de barbo común (75% para 100 l/s y 44% para 250 l/s) y éste a su vez mayor que el de boga del Tajo (43% para 100 l/s y 12% para 250 l/s). Esta escala por tanto es igualmente eficaz para las tres especies pero menos eficiente para el paso de la boga del Tajo. Además, no existe una correlación entre la longitud furcal de los peces y el tiempo de ascensión completo de la escala, al contrario de lo encontrado por otros autores. Esto puede deberse a la escasez de datos o al escaso rango de valores de longitud furcal de los ejemplares que ascendieron. Los individuos que han ascendido lo han hecho superando la velocidad del agua en las hendiduras (1,1 m/s), que es superior a la velocidad crítica de estas especies según anteriores estudios, por lo que no debe utilizarse la velocidad crítica de natación como único criterio biológico de diseño para las escalas, ya que se puede infravalorar las capacidades natatorias de los peces. Además, sería necesario conocer otras variables biológicas, como sus velocidades máximas y óptimas. Por otro lado, en este estudio se ha obtenido que el caudal influye por un lado en el tiempo de registro por la antena primera y, por otro, en el tiempo de ascensión, siendo ambos mayores en los ensayos con caudal de 250 l/s. El caudal influye también en el porcentaje de ascensos, siendo en todos los casos menor con el caudal de 250 l/s, por lo que tampoco debe usarse la velocidad del agua, constante y dependiente del caudal en esta tipología de escalas, como único criterio hidráulico de diseño. Debe haber otras variables relacionadas con el caudal que afecten negativamente al ascenso de los peces por la escala. Otros parámetros observados en este estudio que conviene tener en cuenta a la hora de establecer criterios de diseño que contribuyan a la eficacia de las escalas de peces, son las zonas de recirculación (muy importantes pues los peces permanecen en ellas la mayor parte del tiempo utilizándolas para descansar y para ayudarse a ascender al siguiente estanque) y los deflectores que conforman la hendidura, de los cuales se aprovechan la mayoría de los individuos para ascender. Cabe señalar que las dos especies de ciprínidos han mostrado diferentes preferencias a la hora de elegir la altura a la que remontar la hendidura, lo cual hace que la tipología de hendidura vertical suponga una ventaja dada su versatilidad en este aspecto.

2. INTRODUCCIÓN

En los últimos 100 años los ecosistemas acuáticos continentales han sufrido una intensa intervención que ha ocasionado un gran impacto en la biodiversidad de la ictiofauna (Cowx y Collares-Pereira, 2002). Hoy en día en nuestro país existe una legislación traspuesta de la legislación europea como la Directiva Marco del Agua, la Directiva Hábitats y la Directiva de Evaluación de Impacto Ambiental, que tienen entre sus objetivos alcanzar un «buen estado» ecológico y químico de todas las aguas comunitarias para 2015, contribuir al mantenimiento de la biodiversidad en los Estados miembros definiendo un marco común para la conservación de los hábitats y la fauna y la flora de interés comunitario y en su caso, establecer las medidas de reducción de los efectos negativos del proyecto.

La falta de transitabilidad de los ríos por la existencia de obras hidráulicas transversales es un hecho constatado por numerosos investigadores; recientemente se ha comprobado que en la cuenca del río Guadalquivir dicha falta de transitabilidad producida por la existencia de numerosas presas es la tercera causa de la gran disminución de peces (Fernández-Delgado et al., 2010)

Las escalas de peces son, a día de hoy, una de las medidas correctoras más frecuentemente utilizadas para minimizar el efecto barrera que suponen, para el desplazamiento de los peces, obras transversales como son las presas y los azudes. Y es necesario poder evaluar la eficacia de esta medida con la finalidad de alcanzar los objetivos antes mencionados.

La mayor parte de los estudios sobre la eficacia de las escalas de peces se basan principalmente en la investigación en modelos físicos en laboratorio, analizando básicamente parámetros hidráulicos y los estudios que ensayan con peces lo hacen en cámaras de natación y en canales (Peake et al., 1997; Toepfer et al., 1999; Peake, 2008a), cuyo funcionamiento hidráulico es muy diferente al que se da en una escala de peces.

Por otra parte a día de hoy, el esfuerzo científico y técnico se ha centrado en los salmónidos por lo que es necesario evaluar la eficacia de las escalas para otras familias de peces, como los ciprínidos, una de las familias más importantes de la Península Ibérica por su abundancia, distribución, riqueza y biodiversidad. Respecto a la capacidad natatoria de los peces, existe una abundante información para salmónidos (Tudorache et al., 2008), sin embargo no sucede lo mismo para ciprínidos ibéricos (Silva, 2009).

La experimentación que se detalla en este proyecto se ha llevado a cabo en un modelo físico de escala de hendidura vertical (escala 1:1) existente en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios de Experimentación y Obras Públicas (CEDEX).

El CEDEX es un organismo autónomo, adscrito orgánicamente al Ministerio de Fomento y funcionalmente a los Ministerios de Fomento y de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. El Organismo proporciona apoyo multidisciplinar en las tecnologías de la ingeniería civil, la edificación y el medio ambiente, y asiste tanto a las administraciones e instituciones públicas como a empresas privadas. Se compone de una serie de unidades técnicas especializadas denominadas Centros y Laboratorios, que proporcionan asistencia técnica de alto nivel, investigación aplicada y desarrollo tecnológico en el marco de la ingeniería civil. Una de estas unidades es el Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) es la Unidad que dentro del CEDEX está especializada en temas de planificación hidrológica; evaluación de recursos hídricos, inundaciones, sequías y sistemas de alerta en tiempo real; calidad de las aguas continentales y del medio ambiente hídrico; evaluación de demandas y estudios territoriales; normativa y reglamentación técnica; tecnologías de depuración, reutilización y desalación; sedimentación en embalses; y modelos (físicos y matemáticos) de hidráulica fluvial y de dispositivos hidráulicos.

El Laboratorio de Hidráulica es el área del CEH dedicada al estudio de la mecánica de fluidos, en especial del agua y su comportamiento en sus cauces naturales o en estructuras hidráulicas creadas por el hombre. También se estudia el comportamiento de los de los sedimentos dentro del agua. Para hacer estos estudios se desarrollan nuevas herramientas matemáticas o se ensaya en modelos físicos contruidos ad hoc, gracias a las punteras instalaciones de que está dotado. Se desarrolla software especializado y se realizan ensayos en prototipo.

La tipología de escala elegida para comenzar el estudio ha sido la de hendidura vertical, que a pesar de no ser de las más frecuentes en nuestro país (Elvira et al., 1998), presenta una serie de ventajas (Odeh, 1999): es idónea para caudales incontrolables u oscilantes (una característica de los ríos de regímenes mediterráneos), se puede adaptar a las variaciones de calado, proporciona áreas de descanso a los peces, permite ascender a los peces a la profundidad que ellos elijan y es de fácil mantenimiento. Cabe señalar que en esta tipología la velocidad del agua en la hendidura, punto obligado de paso de los peces, no varía con la profundidad y es independiente del caudal lo que constituye una ventaja pues su funcionamiento hidráulico permanecerá constante frente a las variaciones naturales de caudal sin necesidad de elementos de regulación (Pena et al., 2006).

Los resultados que aquí se presentan son los primeros obtenidos en los ensayos llevados a cabo con las especies: trucha común (*Salmo trutta*), boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*) y barbo común (*Luciobarbus bocagei*).

El objetivo del proyecto es mejorar el conocimiento de los parámetros hidráulicos y biológicos necesarios para evaluar la eficacia de las escalas para peces.

3. METODOLOGÍA

3.1. Escala de peces

Los ensayos se han llevado a cabo en un modelo físico de escala de hendidura vertical a tamaño real (escala 1:1), constituida por un canal rectangular de 20 m de longitud, 1,5 m de ancho y 1,0 m de alto, dividido en 11 estanques (figura 1).



Figura 1. Modelo físico de la escala de peces en el Laboratorio de Hidráulica del CEH

La escala ocupa una superficie en planta de 27 m longitud x 4,5 m ancho y tiene una pendiente longitudinal del 7,5 %. El depósito general de agua, que dispone de un sistema de filtración mecánica y biológica, almacena unos 135.000 litros, con un sistema de recirculación del agua constituido por dos bombas hidráulicas de hasta 250 l/s cada una. (figura 2).

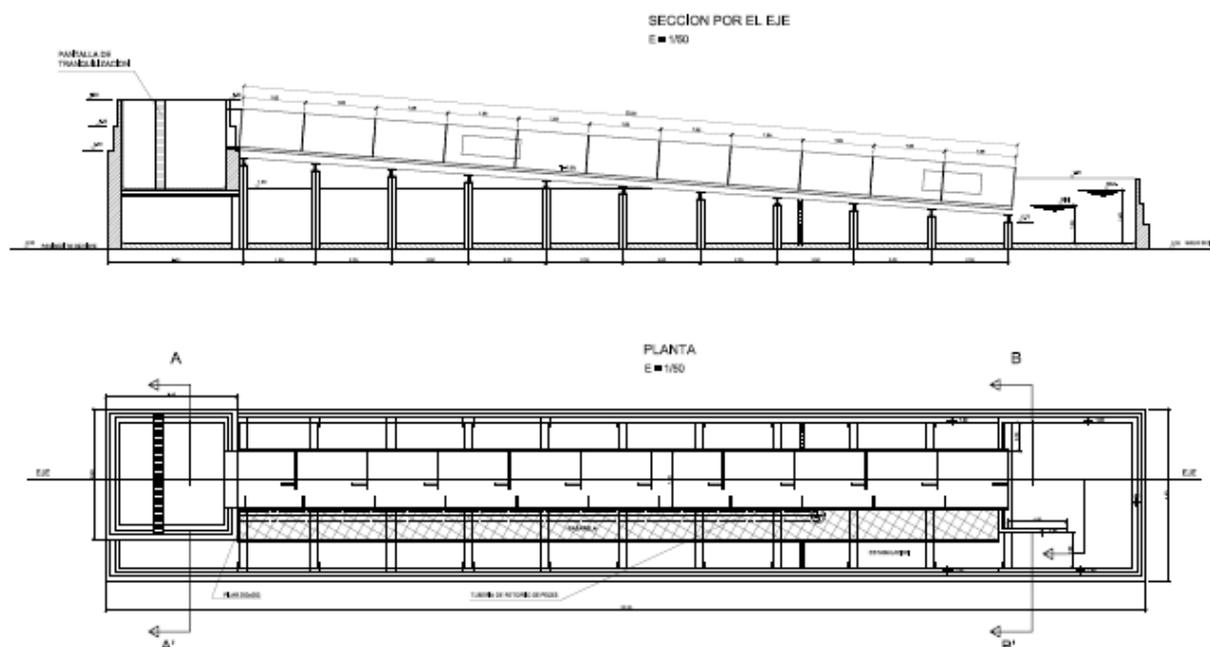


Figura 2. Plano del modelo físico de la escala de peces. Vista lateral y planta.

Los estanques miden 1,85 m de longitud siendo el ancho de la hendidura de 27 cm. La velocidad máxima aproximada que se da en dicha hendidura es de 1,1 m/s y en el flujo principal sobre 1 m/s (figura 3).



Figura 3. Fotografía de la escala de peces en funcionamiento.

Como indican Pena et al (2006), los campos de velocidades y los patrones de flujo de cada estanque conforman tres regiones: una región de flujo directo donde el agua circula con altas velocidades, en una trayectoria curvilínea, desde la hendidura hasta la siguiente hendidura aguas abajo del estanque, y dos regiones de recirculación (una “grande” y una “pequeña”), caracterizadas por sus bajas velocidades, y por el flujo en sentido inverso (figura 4).

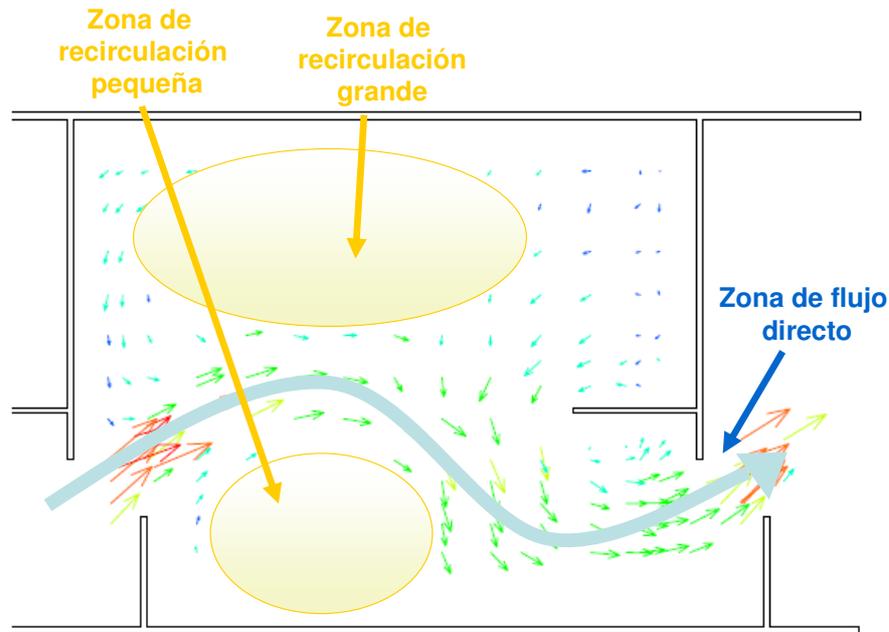


Figura 4. Campos de velocidades y patrones de flujo en cada estanque de la escala.

La calidad del agua se ha controlado periódicamente para asegurar el bienestar de los peces, siguiendo los criterios indicados por la Directiva 2006/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de septiembre de 2006, relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces y por la Guía sobre el cuidado y utilización de peces en investigación, docencia y ensayos en laboratorio (Canadian Council on Animal Care, 2005).

3.2. Procedencia y transporte de los ejemplares

Los ejemplares de trucha común que se han utilizado en los ensayos, han procedido de la Piscifactoría Regional “Rincón de Uña”, gestionada por la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Comunidades de Castilla la Mancha, Uña (Cuenca). Los ejemplares de boga del Tajo han nacido y han sido criados en la Piscifactoría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, y los ejemplares de barbo común han sido capturados mediante pesca eléctrica en el río Cofio, aguas abajo de la estación

de aforos situada en San Martín de Valdeiglesias. Previo a los ensayos en el Laboratorio de Hidráulica, los ejemplares con los que se ha ensayado han pasado al menos una semana en la Piscifactoría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.

El transporte de los peces hasta las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica del CEDEX, se ha realizado en bidones y con aireadores para asegurar el bienestar de los ejemplares.

3.3. Identificación y seguimiento de los peces.

El método utilizado para la localización e identificación de los peces durante la experimentación en la escala, ha sido un sistema de radiofrecuencia que aplica la tecnología de los transpondedores integrados pasivos (PIT tag), siguiendo la metodología indicada por Castro-Santos et al. (1996).

Se ha instrumentado la escala de peces con dos antenas colocadas en puntos de obligado paso en sus dos extremos. La primera para detectar la aproximación o entrada en la escala, en la hendidura existente entre el recinto de aguas abajo de la escala y el primer estanque. La segunda está situada en la hendidura entre el estanque undécimo y el recinto de aguas arriba de la escala, con el objetivo de detectar la finalización de la ascensión de los peces.

Estas antenas están conectadas a un emisor/lector y se ha implantado un microcircuito (PIT tag), con un único código determinado, en cada ejemplar de pez. El PIT tag utilizado en todos los ensayos mide 11 mm (Allflex, modelo FDX-B). La inserción del microchip se ha realizado en la cavidad abdominal del individuo previamente anestesiado con tricafina metansulfonato (MS-222) mediante ayuda de jeringas y agujas específicas (figura 5).



Figura 5. Inserción de PIT tag de 11 mm en una trucha común anestesiada.

De este modo, cuando los peces marcados pasan por las proximidades de las antenas, el PIT tag interactúa electromagnéticamente con ellas, recibiendo el circuito lector asociado a cada antena el código único de identificación asignado a cada pez. Se ha obtenido así la información en tiempo real en un sistema informático de los movimientos de los peces durante los ensayos (figura 6).

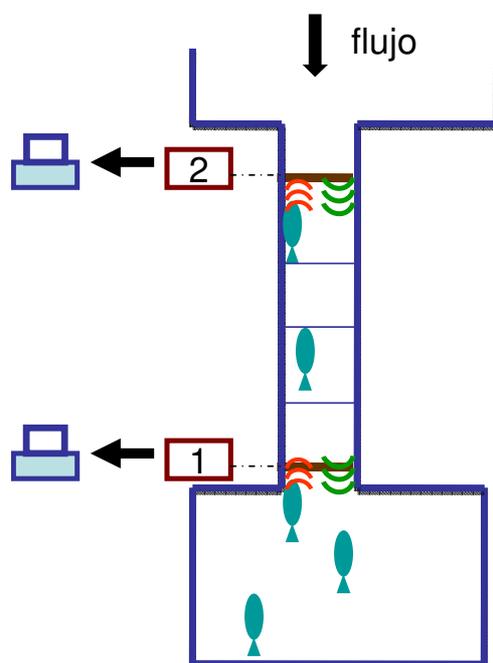


Figura 6. Esquema de la localización de las dos antenas en la escala con sus respectivos lectores y su interacción con los PIT tags implantados en los peces.

3.4. Protocolo de ensayos

Los ensayos que aquí se comentan se han llevado a cabo entre enero y mayo de 2010, respetando la época de reproducción de las distintas especies: trucha común (*Salmo trutta*), boga del Tajo (*Pseudochondrostoma polylepis*) y barbo común (*Luciobarbus bocagei*).

Se han realizado dos ensayos con cada especie, uno ha sido con un caudal bajo circulante por la escala (100 l/s) y otro con un caudal más alto (250 l/s). Para cada uno de estos dos caudales se han fijado los niveles del agua en el recinto de aguas abajo de la escala, con la finalidad de permitir la existencia de una llamada efectiva hacia la escala.

Los peces se han traído al Laboratorio de Hidráulica desde la Piscifactoría de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, de la Universidad Politécnica de Madrid y previo a cada ensayo, los ejemplares han sido medidos, pesados y marcados con un PIT tag. Después, ha transcurrido un periodo mínimo de 48 horas de descanso y aclimatación hasta la realización del

ensayo. Al comienzo de cada ensayo, aproximadamente a las 9:00 AM, se ha colocado a los peces en el recinto de aguas abajo de la escala, se ha fijado el caudal correspondiente y se ha permitido el movimiento voluntario de los ejemplares durante 24 horas, tiempo durante el cual las bombas y las antenas, han funcionado ininterrumpidamente. Las cámaras de video han realizado grabaciones de aproximadamente 8 horas de duración en cada ensayo. Una vez finalizados, los ejemplares han sido devueltos a la piscifactoría. Durante el periodo de estancia en el Laboratorio, no se ha proporcionado alimento a los peces que iban a participar en los ensayos con la finalidad de conseguir el mismo estado de repleción gástrica en todos los individuos.

El número de peces utilizado para cada ensayo, así como su longitud furcal, puede consultarse en la Tabla 1. Para las distintas especies, los ensayos con los caudales de 100 l/s y 250 l/s han sido realizados en el año 2010 en las siguientes fechas: Para la trucha común, los días 28 de enero y 3 de febrero, respectivamente. En el caso de la boga del Tajo los días 8 y 15 de abril. Finalmente, los ensayos con barbo común se han llevado a cabo los días 13 y 20 de mayo.

Tabla 1. Número de ejemplares de las tres especies que participaron en los ensayos con 100 l/s y 250 l/s y media de la longitud furcal (rango entre paréntesis) en cm.

	100 l/s		250 l/s	
	Nº ejemplares	Media LF (Rango) cm	Nº ejemplares	Media LF (Rango) cm
Trucha común	10	21 (19 - 26,2)	6	19,6 (18,1 - 24,4)
Boga del Tajo	14	17,1 (14,4 - 24,2)	17	17 (13,8 - 25)
Barbo común	20	33,5 (16,3 - 41,6)	16	33,1 (31 - 38,8)

3.5. Análisis del comportamiento de los peces mediante imágenes de video

Se han utilizado, durante la experimentación con bogas y barbos, cuatro cámaras subacuáticas de pequeño tamaño y alta resolución para captar imágenes de los peces en los estanques. Este análisis no se ha realizado con truchas debido a no disponer de la instrumentación necesaria durante la realización de los ensayos con esta especie.

Las cuatro cámaras se han situado en cuatro estanques de la escala de peces: en el primero, en el cuarto, en el séptimo y en el undécimo, enfocando a la hendidura y a los deflectores que la forman. Mediante esta instrumentación se ha procedido a realizar un análisis exhaustivo de la grabación de los cuatro ensayos, estudiando tendencias y pautas de comportamiento en el momento en que un pez asciende de un estanque al siguiente. Se han medido tres aspectos generales de las subidas que son detectadas con claridad por los vídeos:

- Desde dónde ha pasado el pez al siguiente estanque: Los peces han pasado desde cualquiera de las dos zonas de recirculación (figura 4): zona de recirculación grande (ZRG) o zona de recirculación pequeña (ZRP) de la forma que se esquematiza en la figura 7.

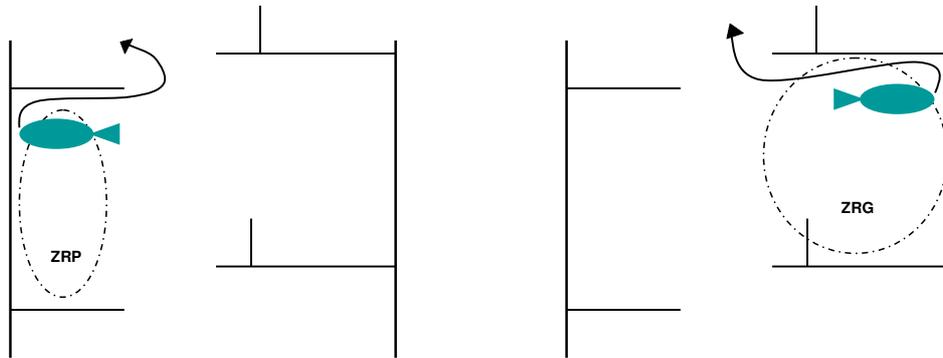


Figura 7. Esquema aproximado de peces ascendiendo al siguiente estanque desde la zona de recirculación pequeña (ZRP) y desde la zona de recirculación grande (ZRG) respectivamente.

- Altura de la hendidura a la que el pez ha pasado de un estanque a otro: Los peces han ascendido por el fondo (cuando el pez sube al siguiente estanque muy cerca del suelo de la escala) por el medio (cuando el pez pasa aproximadamente por el centro de la hendidura), o por la superficie (cuando el pez asciende cerca de la superficie de la hendidura) (figura 8).



Figura 8. Imagen obtenida por una videocámara sumergida. Se ha realizado una representación de las dos zonas de recirculación, de los dos deflectores (grande y pequeño) y de la altura a la que puede pasar un pez por la hendidura (superficie, medio y fondo).

- Cercanía a los deflectores en su ascenso por la hendidura: Los individuos han ascendido pasando cerca del deflector pequeño (DP), cerca del deflector grande (DG) o por el centro de la hendidura (sin aproximarse a ningún deflector) (figura 8).

3.6. Estadística

Para relacionar las ascensiones completas de la escala, los tiempos de aproximación a la antena primera y el de ascensión completa de la escala con la especie, el caudal y la longitud furcal, se han ajustado los datos a modelos de regresión logística (GLM) aplicando el Criterio de Información de Akaike mediante el paquete “Stats” de R (2010).

Se han realizado pruebas de normalidad con el test Shapiro-Wilk. Para comparar las medias, cumplido el supuesto de normalidad, se ha empleado el test de la T de Student, y para comprobar la igualdad de las varianzas se ha aplicado el test de Levene. En caso de no cumplir el supuesto de normalidad se ha aplicado el test Z de Kolmogorov-Smirnov. Se han realizado correlaciones de Pearson en el caso de que los datos fueran normales y correlaciones de Spearman en el caso de que no lo fueran. Para poder realizar las comparaciones de los resultados obtenidos para una misma especie en los ensayos con los dos caudales, se ha comprobado previamente que no existían diferencias significativas entre la longitud furcal de las truchas comunes (Z de Kolmogorov-Smirnov $p=0,888$), ni entre la longitud furcal de las bogas

(Z de Kolmogorov-Smirnov $p=0,752$), ni entre la longitud furcal de los barbos (Z de Kolmogorov-Smirnov $p=0,698$).

Para analizar el comportamiento de los peces durante los ascensos, se ha estudiado la relación de las variables "Especie" y "Caudal" con las variables "Desde dónde pasa", "Altura de paso" y "Cercanía a los deflectores" utilizando el estadístico chi cuadrado mediante un test de independencia. Todos estos análisis se han realizado con la versión 15.0.1. del SPSS para Windows (2006).

También se ha realizado una comparación entre frecuencias observadas y esperadas dentro de cada una de las variables "Desde dónde pasa", "Altura de paso" y "Cercanía a los deflectores", por especie y caudal, mediante un test de bondad de ajuste con chi cuadrado. Estos análisis se han realizado con Microsoft Office Excel SP3, parte de Microsoft Office Professional Edition (2003).

4. RESULTADOS

4.1. Registros por la primera antena

El 100% de los individuos de trucha común que participaron en los ensayos con ambos caudales han sido registrados por la primera antena y, lo mismo, ha sucedido con los individuos de boga que participaron en el ensayo con 100 l/s. En cambio en el ensayo de 250 l/s se han registrado un 88% de bogas. El registro de los individuos de barbo es mayor en el ensayo de 100 l/s que en el de 250 l/s, no llegando a ser del 100% en ninguno de los casos (tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje de individuos de las tres especies registrados por la primera antena y frecuencia y porcentaje de individuos que han completado la ascensión.

Caudal	Trucha común		Boga del Tajo		Barbo común	
	100 l/s	250 l/s	100 l/s	250 l/s	100 l/s	250 l/s
Nº de individuos	10	6	14	17	20	16
Registros por la primera antena (%)	100	100	100	88	90	75
Ascensos completados (frecuencia)	9	4	6	2	15	7
Ascensos completados (%)	90	67	43	12	75	44

4.2. Ascensos completos de la escala

El porcentaje de individuos de trucha común que ascendieron completamente la escala ha sido mayor que el de barbo común y que el de boga del Tajo. En los tres casos se ha observado una diferencia entre los ascensos con los dos caudales, siendo mayor el porcentaje de ascensiones con el caudal de 100 l/s (tabla 2), aunque las únicas variables dependientes son “Boga del Tajo” y “Caudal” (Chi cuadrado $p=0,049$). En cambio las variables “Trucha común” y “Caudal” y “Barbo común” y “Caudal” son significativamente independientes (Chi cuadrado $p=0,247$ y $p=0,056$ respectivamente). Los resultados del GLM indican que las variables especie ($p=0,0207$) y longitud furcal ($p=0,0226$) tienen un efecto significativo en las ascensiones completas de la escala.

4.3. Longitud furcal de los individuos más pequeños que han ascendido la escala

Los individuos más pequeños que han ascendido completamente la escala en los ensayos de 100 l/s presentaron una longitud furcal de 19 cm, 16,3 cm y 31,9 cm (trucha, boga y barbo, respectivamente). En los ensayos de 250 l/s, presentaron una longitud furcal de 18,1 cm, 16,5 cm y 31 cm (trucha, boga y barbo, respectivamente).

4.4. Hora de los primeros registros por la primera antena, de inicio y de finalización de la ascensión

Si se realizan comparaciones entre individuos de la misma especie que participaron en los ensayos con los dos caudales, no se observan diferencias significativas entre la hora media de registro por la primera antena, la hora media de inicio de la ascensión ni la hora media de finalización de la ascensión de los ejemplares de boga del Tajo y barbo común. En el caso de la trucha común sí que se encuentra una diferencia significativa entre la hora de inicio de la ascensión (tStudent $0=0,010$) y la hora de finalización de la ascensión (tStudent $p=0,007$), siendo mayor en ambos casos para el ensayo con caudal de 250 l/s (tabla 3).

Tabla 3. Hora media y desviación típica de registro por la primera antena, de inicio de la ascensión y finalización de la ascensión para las tres especies
(*P < 0,05).

Caudal	Trucha común		Boga del Tajo		Barbo común	
	100 l/s	250 l/s	100 l/s	250 l/s	100 l/s	250 l/s
Hora de registro	11:36:34 ± 1:44:12	12:53:44 ± 4:24:49	10:19:55 ± 0:57:12	12:26:00 ± 3:54:46	15:13:26 ± 3:02:49	14:31:36 ± 4:28:20
Hora de inicio	11:30:18* ± 1:44:57	14:51:22* ± 1:57:05	10:57:40 ± 2:15:29	10:22:04 ± 0:50:46	14:00:12 ± 7:11:44	14:40:34 ± 2:51:54
Hora de finalización	12:24:23* ± 2:07:22	16:52:38* ± 2:32:49	12:40:41 ± 1:57:58	13:18:08 ± 1:27:58	14:41:59 ± 7:08:47	16:31:52 ± 3:58:48

4.5. Tiempo que han tardado los peces en registrarse por la primera antena

El tiempo medio que ha transcurrido desde el comienzo del ensayo hasta que los peces se han registrado por la primera antena (tabla 4) es mayor para los barbos comunes, sin embargo, los resultados del GLM indican que es el caudal ($p=0,00632$) y la interacción entre el caudal y la longitud furcal ($p=0,04960$) las variables que tienen un efecto significativo en este tiempo. De todos modos, cabe señalar que al realizar las comparaciones entre los individuos de la misma especie que participaron en los ensayos con los dos caudales, no se han encontrado diferencias significativas para ninguna de las especies (figura 9).

Tabla 4. Tiempo (en segundos) que tardan en ser detectados por la primera antena y longitudes furcales (LF) de las tres especies (N: número de individuos, \bar{x} : media, Me: mediana, Máx: Rango superior y Mín: Rango inferior).

	Trucha común		Boga del Tajo				Barbo común					
	100l/s N=10	250l/s N=6	100l/s N=14	250l/s N=15	100l/s N=18	250l/s N=13						
	Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF				
\bar{x}	8554,9	21,0	26384,8	20,4	4195,1	17,1	16980,1	17,2	20865,5	33,7	25703,6	33,1
Me	9401,5	19,9	16048,5	19,8	3156,5	16,3	4783,0	16,5	21104,0	33,7	19533,0	32,5
Máx	18112,0	26,4	68823,0	24,4	16069,0	24,2	80102,0	25,0	42616,0	41,6	76210,0	38,8
Mín	1222,0	19,0	13392,0	18,1	3120,0	14,4	1630,0	13,8	2823,0	16,3	3898,0	31,0

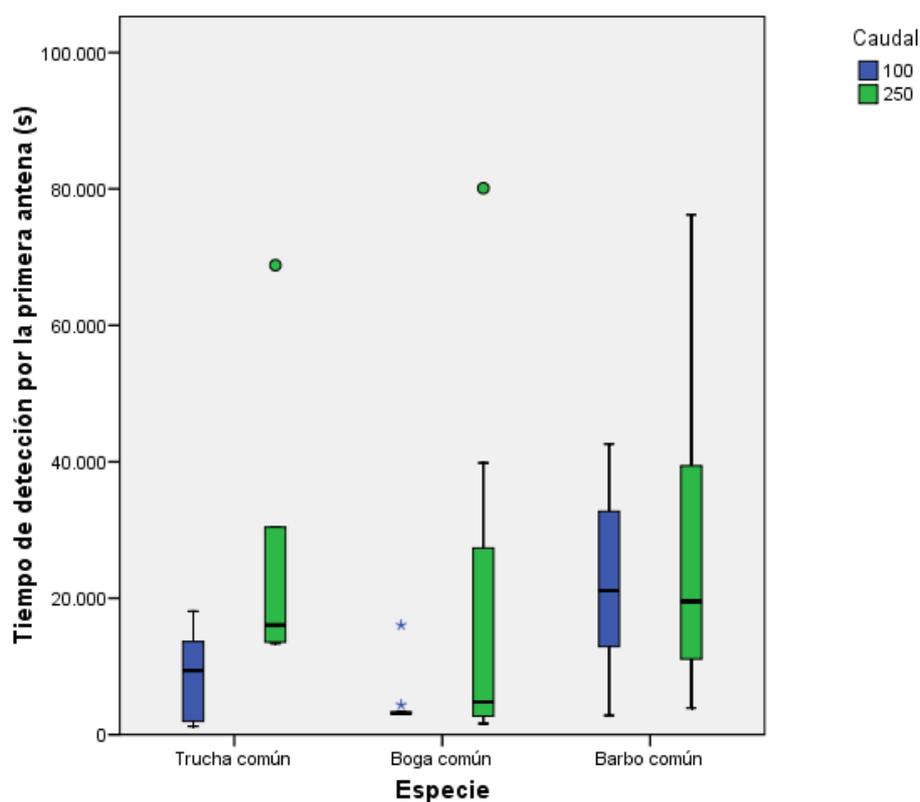


Figura 9: Tiempo medio (en segundos, s) en registrarse los peces por la primera antena.

La tabla completa con la relación de los tiempos que tardaron cada uno de los individuos en ser registrados por la primera antena y sus respectivas longitudes furcales, aparece en el Anexo I (tabla 1).

4.6. Tiempo que tardaron los peces en los ascensos completos de la escala

El tiempo medio que tardaron los peces en ascender la escala por completo (tabla 5), es mayor para las bogas comunes, siendo el caudal, según los resultados que indica el GLM, la variable que tiene un efecto significativo en este tiempo ($p=0,01$). Al realizar las comparaciones para cada especie, entre los individuos que participaron en los ensayos con los dos caudales, se encontraron diferencias significativas para la trucha común (Z de Kolmogorov-Smirnov $p=0,025$) y para el barbo común (Z de Kolmogorov-Smirnov $p=0,003$) (Figura 10).

Tabla 5. Tiempo (en segundos) que tardan en realizar los ascensos completos y longitudes furcales (LF) de las tres especies (N: número de individuos, \bar{x} : media, Me: mediana, Máx: Rango superior y Mín: Rango inferior) (* $P<0,05$),

	Trucha común		Boga del Tajo		Barbo común							
	100l/s N=9	250l/s N=4	100l/s N=6	250l/s N=2	100l/s N=14	250l/s N=6						
	Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF						
\bar{x}	3245,6	21,2	7275,8	20,4	6181,7	19,1	10564,0	20,8	946,4	35,7	2589,5	33,1
Me	2591,0*	20,0	6275,5*	19,6	5128,0	18,7	10564,0	20,8	894,0*	34,1	2117,5*	32,8
Máx	7653,0	26,4	10725,0	24,4	13226,0	24,2	12142,0	25	2108,0	41,6	4955,0	34,9
Mín	1520,0	19,0	5827,0	18,1	2150,0	16,3	8986,0	16,5	412,0	31,9	1260,0	31,4

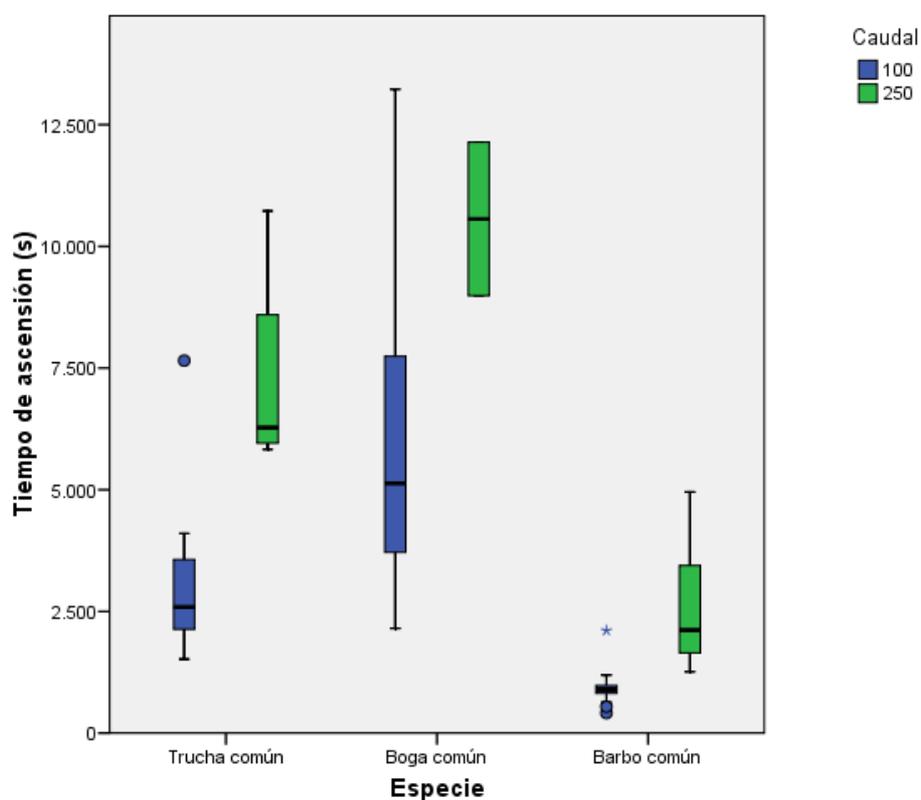


Figura 10. Tiempo (en segundos, s) que tardan los peces en ascender la totalidad de la escala. Se representan cuartiles, rangos y valores atípicos.

La tabla completa con la relación de los tiempos que tardaron todos los individuos que ascendieron la escala y sus respectivas longitudes furcales, se muestra en el Anexo I (tabla 2).

4.7. Correlación longitud furcal-tiempo de registro por la primera antena y tiempo de ascensión

No existe una correlación lineal estadísticamente significativa entre la longitud furcal de los ejemplares de la misma especie que participaron en los dos ensayos con los dos caudales, con el tiempo de registro por la primera antena y con el tiempo de ascensión completa, excepto con el tiempo de registro por la primera antena del ensayo de 250 l/s con boga del Tajo (tabla 6).

Tabla 6: Correlación de Spearman (r) ente la longitud furcal (en cm) de los ejemplares que participan en los ensayos con los dos caudales y las variables tiempo de registro por la primera antena (en segundos, s) y tiempo de ascensión completa de la escala (en segundos, s). N es el número de individuos que se registraron por la primera antena o que realizaron la ascensión completa.

(* $P < 0,05$).

Especie	Variable dependiente	100 l/s	250 l/s
		(N) r	(N) r
Trucha común	Tiempo de registro por la primera antena	(10) -0,188	(6) -0,086
	Tiempo de ascensión	(9) -0,577	(4) -0,8
Boga del Tajo	Tiempo de registro por la primera antena	(14) -0,434	(15) -0,593*
	Tiempo de ascensión	(6) -0,691	(2) -
Barbo común	Tiempo de registro por la primera antena	(18) 0,212	(13) 0,003
	Tiempo de ascensión	(14) 0,073	(6) 0,314

4.8. Análisis del comportamiento durante el ascenso desde un estanque al inmediatamente superior

Se ha detectado que los individuos de las tres especies han realizado el ascenso al estanque superior desde las zonas de recirculación (independientemente de hacerlo desde la zona de recirculación grande o pequeña), y no desde el flujo principal. Mediante observaciones personales, se ha detectado que el flujo principal solo es utilizado justo en el momento en que han ascendido (o lo han intentado) y cuando han cambiado de una zona de recirculación a otra, minimizando al máximo este tiempo de utilización.

4.8.1. Boga del Tajo

Se han obtenido las frecuencias y las proporciones medias de subida en los ensayos respecto a las tres variables, analizando las imágenes obtenidas en los cuatro estanques para los dos caudales ensayados (tabla 7).

Tabla 7. Frecuencias de subida en los ensayos de boga del Tajo respecto a: desde dónde pasan (zona de recirculación pequeña (ZRP) o zona de recirculación grande (ZRG)), altura de paso (fondo, medio o superficie) y cercanía a deflectores en el paso (cercanía al deflector pequeño (DP), cercanía al deflector grande (DG) o por el centro). Porcentajes entre paréntesis.

* Diferencias significativas ($P < 0,05$) entre frecuencias observadas y esperadas para una misma variable

Boga del Tajo		100 l/s	250 l/s
Desde dónde pasa	ZRP	27 (69,2%)*	12 (80%)*
	ZRG	12 (30,8%)*	3 (20%)*
Altura del paso	Fondo	27 (75%)*	7 (41,2%)
	Medio	4 (11,1%)*	5 (29,4%)
	Superficie	5 (13,9%)*	5 (29,4%)
Cercanía a deflectores	Cerca de deflectores	30 (83,3%)*	11 (78,6%)*
	Centro	6 (16,7%)*	3 (21,4%)*

Se ha observado que las variables “Desde dónde pasa” y “Caudal” son significativamente independientes (Chi cuadrado $p = 0,429$), al igual que lo son las variables “Altura” y “caudal” (Chi cuadrado $p = 0,055$) y las variables “Cercanía a deflectores” y “Caudal” (Chi cuadrado $p = 0,694$).

En cambio se han observado diferencias significativas entre las frecuencias observadas y esperadas en las tres variables para el caudal de 100 l/s (Chi cuadrado: “Desde dónde pasa” $p = 0,016$ “Altura de paso” $p = 0,000$ y “Cercanía a deflectores” $p = 0,000$) y en las variables “Desde dónde pasa” (Chi cuadrado $p = 0,020$) y “Cercanía a deflectores” (Chi cuadrado $p = 0,033$) para el caudal de 250 l/s, con lo que no podemos aceptar la hipótesis de que los datos estén distribuidos al azar y se ajusten a una distribución uniforme.

En la variable “Desde dónde pasa” la frecuencia mayor se da en la ZRP para ambos caudales. En la variable “Altura de paso” la frecuencia mayor se encuentra en “Fondo” para los dos caudales, y en la variable “Cercanía a los deflectores” la frecuencia mayor es “Cerca de los deflectores” también para ambos caudales.

4.8.2. Barbo común

Se han obtenido las frecuencias y las proporciones medias de subida en los ensayos respecto a las tres variables, analizando las imágenes obtenidas en los cuatro estanques para los dos caudales ensayados (tabla 8).

Tabla 8. Frecuencias de subida en los ensayos de boga del Tajo respecto a: desde dónde pasan (zona de recirculación pequeña (ZRP) o zona de recirculación grande (ZRG)), altura de paso (fondo, medio o superficie) y cercanía a deflectores en el paso (cercanía al deflector pequeño (DP), cercanía al deflector grande (DG) o por el centro). Porcentajes entre paréntesis.

* Diferencias significativas $P < 0,05$ entre frecuencias observadas y esperadas para una misma variable.

+ Dependencia entre la variable señalada y el caudal.

Barbo común		100 l/s	250 l/s
Desde dónde pasa	ZRP	10 (47,6%)	10 (43,5%)
	ZRG	11 (52,4%)	13 (56,5%)
Altura del paso	Fondo	6 (30%)*	6 (26,1%)*
	Medio	14 (70%)*	14 (60,9%)*
	Superficie	0 (0%)*	3 (13%)*
Cercanía a deflectores +	Cerca de deflectores	18 (85,7%)*	11 (50%)
	Centro	3 (14,3%)*	11 (50%)

Se ha observado que las variables “Desde dónde pasa” y “Caudal” son estadística y significativamente independientes (Chi cuadrado $p=0,783$), al igual que lo son las variables “Altura” y “caudal” (Chi cuadrado $p=0,246$). En cambio, las variables “Cercanía a deflectores” y “Caudal” son estadística y significativamente dependientes (Chi cuadrado $p=0,012$), pasando los peces cerca de los deflectores con el caudal bajo y por el centro con el caudal alto.

Existen diferencias significativas entre las frecuencias observadas y esperadas para el caudal de 100 l/s en las variables “Altura de paso” (Chi cuadrado $p=0,000$) y “Cercanía a deflectores” (Chi cuadrado $p=0,001$) y en la variable “Altura de paso” (Chi cuadrado $p=0,008$) para el caudal de 250 l/s, con lo que no podemos aceptar la hipótesis de que los datos de estas tres variables se ajusten a una distribución uniforme.

En la variable “Altura de paso” la frecuencia mayor se encuentra en “Medio” para ambos caudales. Y en la variable “Cercanía a los deflectores” la mayor frecuencia se da en “Cerca de los deflectores” para el caudal de 100 l/s.

4.8.3. Comparación entre ambas especies

Se ha observado que las variables “Especie” y “Desde dónde pasa” y las variables “Especie” y “Cercanía a deflectores” son significativamente independientes para el caudal de 100 l/s (Chi cuadrado $p=0,101$ y $p=0,812$ respectivamente). En cambio, las variables “Especie” y “Altura de paso” son estadística y significativamente dependientes (Chi cuadrado $p=0,000$). En este caso se ha encontrado que la boga asciende por el fondo y el barbo lo hace por el medio.

En cambio, para el caudal de 250 l/s, se ha encontrado que las variables “Especie” y “Altura de paso” y las variables “Especie” y “Cercanía a deflectores” significativamente independientes (Chi cuadrado $p=0,133$ y $p=0,086$ respectivamente). Sin embargo, para este caudal, las variables “Especie” y “Desde dónde pasa” son estadística y significativamente dependientes (Chi cuadrado $p=0,026$), encontrándose que la boga pasa desde la ZRP y el barbo no muestra preferencia al respecto.

Las tablas completas con cada individuo y el registro de su ascenso al estanque inmediatamente superior, se muestran en el Anexo II (tablas 1, 2, 3 y 4).

5. DISCUSIÓN

Según las definiciones de eficacia y eficiencia de Larinier (2001), el modelo de escala de hendidura vertical construido en el Laboratorio del Centro de Estudios Hidrográficos, es igualmente eficaz en cuanto que permite el ascenso a los ejemplares de las tres especies con las que se ha ensayado, aunque es menos eficiente para el paso de la boga del Tajo. Una de las causas que ha influido en este resultado ha sido la longitud furcal de los ejemplares de boga que se han utilizado en este estudio, más pequeños que los ejemplares de trucha y barbo, aunque no se pueden descartar otras variables como puede ser la distinta capacidad natatoria de estas especies.

Con relación a la longitud furcal, y cuando se ha correlacionado este parámetro con el tiempo de ascensión completo de los individuos de cada una de las especies del estudio, los resultados obtenidos no son consistentes con la asunción de que la velocidad es dependiente de la longitud del pez (Hammer, 1995). Ojanguren et al (2003) hallaron una relación positiva significativa entre la longitud de la trucha común y su velocidad de natación y resistencia. Para barbo común, Silva et al. (2010) encontraron que los barbos mayores ascendían la escala con la que ensayaron en mayor proporción y en menos tiempo que los pequeños. Para la misma especie, Mateus et al. (2008) encontraron una relación positiva y significativa entre el tamaño y la velocidad crítica. A la misma conclusión llegó Silva (2009) con respecto a la boga del Tajo. Esta falta de consistencia de los resultados del presente estudio puede ser debido, por un lado, a la escasez de datos para realizar las comparaciones como sucede en el caso de las ascensiones de boga con un caudal de 250 l/s, y por otro a un escaso rango de valores de longitud furcal de los ejemplares que ascendieron, como es el caso del barbo.

Respecto a la capacidad natatoria de los peces, existe una abundante información para salmónidos (Tudorache et al., 2007), sin embargo no sucede lo mismo para ciprínidos ibéricos (Silva, 2009), centrándose la información existente en la velocidad crítica de natación. Una de las aplicaciones prácticas de la velocidad crítica es como criterio de diseño de escalas de peces y de pasos de agua que se instalan en caminos y carreteras (Peake, 2008b). Mateus et al. (2008) han encontrado una velocidad crítica para barbo de $0,81 \pm 0,11$ m/s y Silva (2009) de $0,78 \pm 0,15$ m/s para boga. La velocidad del agua en el modelo de escala de peces en el que se ha ensayado es superior, siendo 1,1 m/s en la hendidura y de 1 m/s en el flujo principal, y aún así hay ejemplares de estas especies que han logrado la ascensión completa.

Para explicar estas ascensiones de las bogas y de los barbos utilizados en el ensayo, sería necesario conocer otras variables biológicas, como la velocidad máxima y óptima de los peces.

El utilizar la velocidad crítica de natación, como criterio único de diseño, es más adecuado para pasos de agua que para escalas de peces, dado el diferente funcionamiento hidráulico de estas infraestructuras.

Por otro lado, estudios previos demuestran que en la tipología de escalas de hendidura vertical la velocidad del agua es independiente del caudal y que por tanto el funcionamiento hidráulico permanece constante frente a las variaciones naturales de caudal (Pena et al., 2006). Esto indicaría que, si únicamente se considerara a la velocidad del agua, como criterio hidráulico de diseño de la escala de peces, el caudal no influiría en las ascensiones de los peces. En cambio, los resultados obtenidos en este estudio indican un efecto del caudal tanto en el tiempo de registro por la antena primera como en el tiempo de ascensión, siendo siempre mayor en los ensayos con caudal de 250 l/s. Para la trucha común, se ha encontrado una diferencia significativa entre la hora de inicio y de finalización de la ascensión, para los dos caudales, siendo mayor en el ensayo con 250 l/s. Del mismo modo, se ha observado una diferencia en el porcentaje de ascensiones para las tres especies entre los ensayos realizados para los dos caudales, aunque solo ha sido significativa para las bogas. Por lo tanto, si la velocidad se mantiene independiente del caudal, debe haber otras variables relacionadas con el caudal que afecten negativamente al ascenso de los peces por la escala, por lo que sería conveniente realizar un estudio hidráulico detallado que mida parámetros como la turbulencia o el calado para ambos caudales. Castro-Santos et al. (2009) apuntan al calado y la turbulencia del agua como variables hidráulicas que deben ser utilizadas como criterios de diseños de pasos para peces.

Hay que señalar además que, en esta tipología de escala, los individuos de las tres especies con las que se ha ensayado permanecen y se desplazan, prácticamente en todo momento, por las zonas de recirculación de cada estanque, donde las velocidades del agua son menores. Wang et al. (2010) al analizar el comportamiento de juveniles de trucha común, encontraron que los peces evitaban las zonas de elevada velocidad en el flujo principal, excepto en la hendidura donde aprovechaban su carácter no estacionario.

Con relación a las dos especies de ciprínidos, al analizar el comportamiento de los ejemplares al ascender de un estanque al inmediatamente superior, se ha observado una clara predisposición por ascender al siguiente estanque desde las zonas de recirculación -donde se registran menores velocidades del agua- en vez de hacerlo directamente desde el flujo principal. Como indica Larinier (2002), los peces son capaces de percibir muy ligeras variaciones en la velocidad del agua y en general, se aprovechan de las zonas más favorables para ayudarse a progresar, como por ejemplo, utilizando un flujo de recirculación para descansar. En concreto, las bogas han mostrado una preferencia significativa para ascender al siguiente estanque desde la zona de

recirculación pequeña (para ambos caudales). En cambio el barbo no ha mostrado preferencia por ascender desde ninguna zona en concreto. Esto puede deberse a que los ejemplares de boga con los que se ha ensayado tienen menor longitud furcal que los de barbo, o también a que la orientación hacia el flujo principal es más sencilla desde esta zona., ya que es más pequeña y es más difícil desorientarse. No obstante sería conveniente realizar más estudios profundizando en este aspecto, por si fuera un parámetro a tener en cuenta en el diseño de esta tipología de escalas.

También en otros estudios se evidencia este uso de las zonas de recirculación, como en el realizado por Mateus (2007) donde los barbos ibéricos utilizan las zonas con baja energía cinética turbulenta como áreas de descanso antes de hacer esfuerzos posteriores para atravesar las zonas de mayor velocidad y turbulencia. Esto pone de relieve la importancia de este parámetro, que debe ser tomado en cuenta en el diseño de pasos de peces (Silva et al 2010).

Por otro lado, se ha observado que los ejemplares de boga, en los ensayos con los dos caudales, pasan preferentemente cerca de los deflectores, en vez de por el centro de la escotadura. Lo mismo sucede con el barbo en el ensayo de 100 l/s, lo que puede ser debido a lo señalado anteriormente por Larinier (2002), que los peces tienen una clara tendencia a aprovechar las zonas más favorables en su ascenso, utilizando las velocidades más bajas de las capas límite que se dan en la proximidad de una superficie (pared o suelo) para avanzar.

Respecto a la altura de paso de la hendidura escogida por los ejemplares en el momento del ascenso al siguiente estanque, se ha observado una variabilidad entre ambas especies. La boga ha mostrado además diferentes preferencias en función al caudal, eligiendo ascender por el fondo con el caudal de 100 l/s y no mostrando preferencia en el de 250 l/s. En cambio el barbo ha mostrado una preferencia por ascender a una altura media en ambos caudales, a pesar de no tener las ventajas que supone hacerlo cerca del suelo, como se comentó anteriormente. Por tanto, las bogas y los barbos difieren a la hora de elegir la altura de paso en su ascenso a través de la hendidura., y esta variabilidad interespecífica convierte a esta tipología de escala en idónea gracias a su versatilidad. Así, se ha confirmado que los peces aprovechan una de las ventajas que según Larinier (2008) ofrecen las escalas de hendidura vertical, que es permitir a los individuos pasar a cualquier altura, desde fondo hasta la superficie, ya que, como apuntan Pena et al (2006), en las escalas de esta tipología, la velocidad del agua en la hendidura, punto obligado de paso de los peces, no varía con la profundidad.

Para finalizar, es necesario comentar que se ha demostrado que los resultados obtenidos en experimentos con peces deben ser aplicados con prudencia al campo (Tudorache et al., 2008)

por lo que sería necesario realizar estos ensayos no solo en modelos sino en escalas de similares características existentes en la Naturaleza.

6. CONCLUSIONES

- El modelo de escala de hendidura vertical construido en el Laboratorio del Centro de Estudios Hidrográficos, es igualmente eficaz en cuanto que permite el ascenso a los ejemplares de las tres especies con las que se ha ensayado, aunque es menos eficiente para el paso de la boga del Tajo.
- En este estudio, la longitud furcal de los peces de cada una de las especies no está correlacionada con el tiempo de ascensión completo de los individuos, lo cual no coincide con los trabajos de otros autores de los que se obtiene que la velocidad es dependiente de la longitud del pez. Esto puede deberse a la escasez de datos para realizar las comparaciones o al escaso rango de valores de longitud furcal de los ejemplares que ascendieron, con lo que convendría realizar más estudios que contemplen más número de individuos y mayores rangos de longitudes furcales.
- Los individuos que han ascendido lo han hecho superando la velocidad existente en las hendiduras (1,1 m/s aproximadamente), que es superior a la velocidad crítica de estas especies según anteriores estudios, con lo que se concluye que no debe utilizarse la velocidad crítica de natación como único criterio biológico de diseño para las escalas, ya que se puede infravalorar las capacidades natatorias de los peces, que pueden desarrollar velocidades más altas que las críticas. Sería necesario por tanto conocer otras variables biológicas, como sus velocidades máximas y óptimas.
- Los resultados obtenidos en este estudio indican un efecto del caudal en el tiempo de registro por la antena primera y en el tiempo de ascensión, siendo siempre mayor en los ensayos con caudal de 250 l/s, y además en el porcentaje de ascensos, siendo menor en el caudal de 250 l/s. De esto se concluye que a pesar de que en esta tipología de escalas la velocidad del agua es independiente del caudal, éste criterio no debe utilizarse como el único criterio hidráulico de diseño para las escalas de peces de hendidura vertical, ya que debe haber otras variables relacionadas con el caudal que afecten negativamente al ascenso de los peces por la escala, por lo que sería conveniente realizar un estudio hidráulico detallado que mida parámetros como la turbulencia o el calado para ambos caudales.
- Otros parámetros a tener en cuenta a la hora de establecer criterios de diseño que contribuyan a la eficacia de las escalas de peces son las zonas de recirculación y los deflectores que conforman la hendidura. Se ha observado que las zonas de recirculación

tienen una alta importancia, pues los individuos permanecen en ellas la mayor parte del tiempo y las utilizan para descansar y para ayudarse a ascender al siguiente estanque. En cuanto a los deflectores, se ha observado que la mayoría de los individuos se valen de las menores velocidades que se dan en su capa límite y de esta manera se aprovechan de ellos para ascender, en lugar de hacerlo por el medio de la hendidura.

- Con relación a las dos especies de criprínidos, estas han mostrado diferentes preferencias a la hora de elegir la altura a la que remontar la hendidura, lo cual hace que la tipología de hendidura vertical pueda suponer una ventaja dada su versatilidad.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Canadian Council on Animal Care. 2005. *CCAC guidelines on: the care and use of fish in research, teaching and testing*. 87 p. Ottawa.
- Castro-Santo T, Cotel A, Webb P. 2009. *Fishway evaluations for better bioengineering: An integrative approach*. American Fisheries Society Symposium 69:557–575.
- Castro-Santos T, Haro A, Walk, S. 1996. *A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways*. Fisheries Research, 28: 253-261.
- Cowx I.G, Collares-Pereira M.J. 2002. *Freshwater fish conservation: options for the future*. In Collares-Pereira, M. J., I. G. Cowx & M. M. Coelho (Eds), *Freshwater Fish Conservation-Options for the Future*. Fishing News Books, 443–452, Oxford.
- Elvira B, Nicola, G.G, Almodóvar A. 1998. *Impacto de las obras hidráulicas en la ictiofauna. Dispositivos de paso para peces en las presas de España*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, 208 p. Madrid.
- Fernández-Delgado C. 2010. *Estado y problemática de conservación de los peces continentales autóctonos de la cuenca del Guadalquivir e inventariación de los tramos fluviales más importantes para su protección*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. 257 p. Córdoba.
- Hammer C. 1995. *Fatigue and exercise tests with fish*. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 112: 1-20.
- Larinier M. 2001. *Dams, fish and fisheries. Opportunities, challenges and conflict resolution*. Environmental issues, dams and fish migrations. En: G. Marmulla (ed.). *FAO Fisheries Technical Paper Nro 419*.
- Larinier M. 2002. *Fishways: General Considerations*. *Bulletin français de la Pêche et de la Pisciculture*. 364: 21-77.
- Larinier M. 2008. *Fish passage experience at small-scale hydro-electric plants in France*. *Hydrobiologia* 609:97-108

- Mateus C.S. 2007. *Performance and swimming behaviour of the Iberian barbel (Barbus bocagei Steindachner, 1865) in an experimental pool-type fishway assessed by electromyogram telemetry*. Tesis. Universidade de Évora, Évora, Portugal.
- Mateus C. S, Quintella B. R, Almeida P. R. 2008. *The critical swimming speed of Iberian barbel Barbus bocagei in relation to size and sex*. Journal of Fish Biology. 73, 1783–1789.
- Odeh M. 1999. *Innovations in fish passage technology*. American Fisheries Society, Bethesda, 209 p. Maryland.
- Ojanguren A. F, Braña F. 2003. *Effects of size and morphology on swimming performance in juvenile brown trout (Salmo trutta L.)*. Ecology of Freshwater Fish 2003: 12: 241-246.
- Peake S.J. 2008a. *Gait transition speed as an alternate measure of maximum aerobic capacity in fishes*. Journal of Fish Biology, 72: 645–655.
- Peake S.J. 2008b. *Swimming performance and behaviour of fish species endemic to Newfoundland and Labrador: A literature review for the purpose of establishing design and water velocity criteria for fishways and culverts*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science 2843, v52 p.
- Peake S.J, Beamish F.W.H, McKinley R.S, Scruton D.A, Katopodis C. 1997. *Relating swimming performance of lake sturgeon, Acipenser fulvescens, to fishway design*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 54: 1361-1366.
- Pena L, Puertas J, Teijeiro T, Peña E. 2006. *Dispositivos de remonte para peces: escalas de hendiduras verticales*. Ingeniería del Agua, 13 (2): 113-128.
- R Development Core Team. 2010. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Silva F.A. 2009. *Determinação das velocidades críticas de natação da boga-comum (Pseudochondrostoma polylepis Steindachner, 1865) e do escalão do Norte (Squalius carolitertii Doadrio, 1988)*. Tesis. Universidade de Évora e Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa. 25 p.

Silva A.T, Santos J.M, Ferreira M.T, Pinheiro A.N, Katopodis C. 2010 early view. *Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (Luciobarbus bocagei, Steindacher 1864) in an experimental pool-type fishway*. River Research and Applications. DOI: 10.1002/rra.1465.

SPSS Inc. 2006. *SPSS Base 15.0 for Windows User's Guide*. SPSS Inc., Chicago IL.

Toepfer C.S, Fisher W.L, Haubelt J.A. 1999. *Swimming performance of threatened leopard darter in relation to road culverts*. Transactions of the American Fisheries Society, 128: 155–161.

Tudorache C, Viaene P, Blust R, Vereecken H, De Boeck G. 2008. *A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species*. Ecology of Freshwater Fish, 17(2): 284-291.

Tudorache C, Viaene P, Blust R, Vereecken H, De Boeck G. 2007. *A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species*. Ecology of Freshwater Fish 2007. Journal compilation.

Wang R.W, David L, Larinier M. 2010. *Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes*. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems 396, 02.

ANEXO I. Tablas completas de tiempos y longitudes de los individuos analizados.

Trucha común		Boga del Tajo				Barbo común					
100l/s N=10		250l/s N=6		100l/s N=14		250l/s N=15		100l/s N=18		250l/s N=13	
Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF
13696	19	18310	19	16069	16,2	27439	17,4	15627	33,3	19465	34,9
1911	20	30445	19	3157	17,9	2905	19,3	17098	32,2	17239	32,0
1962	20	68823	21	3154	17,3	2547	20,7	4662	34,2	21798	32,5
3442	26	13392	20	3155	19,1	17791	14,8	16277	41,6	39398	31,4
13669	20	13787	18	3308	16,0	1630	25,0	5891	24,4	4039	33,2
18112	20	13552	24	3155	24,2	2692	15,6	2823	32,2	3898	31,8
12732	20			3310	16,0	2743	21,2	25157	32,1	7673	32,4
6118	26			3312	14,4	4783	16,8	33826	38,2	40265	32,5
12685	19			3150	14,9	39831	14,9	32754	38,7	76210	31,0
1222	20			3156	14,9	27300	17,0	32747	31,8	43995	34,0
				4369	14,7	6060	15,7	42616	34,9	29534	34,5
				3120	18,2	33450	13,8	35268	34,0	11100	31,4
				3196	19,1	80102	14,3	25669	16,3	19533	38,8
				3120	16,3	2737	16,5	26182	40,8		
						2691	15,1	25110	33,2		
								15649	40,4		
								5310	31,9		
								12913	36,6		

Tabla 1. Tiempos de registro hasta la primera antena de todos los individuos

Trucha común		Boga del Tajo				Barbo común					
100l/s N=9		250l/s N=4		100l/s N=6		250l/s N=2		100l/s N=14		250l/s N=6	
Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF	Tiempo	LF
2591	19,6	6085	19	13226	17,9	8986	25	903	33,3	4955	35
3565	19,5	6466	20,2	3714	19,1	12142	16,5	979	32,2	2015	32
2007	26,2	10725	18,1	3714	24,2			412	34,2	3441	33
3070	20,0	5827	24,4	7744	18,2			2108	41,6	1260	32
7653	20,0			2150	19,1			885	32,2	1646	35
2135	19,7			6542	16,3			877	32,1	2220	31
2568	26,4							634	38,2		
4101	19,0							542	38,7		
1520	20,2							1167	34,0		
								1190	40,8		
								825	33,2		
								817	40,4		
								941	31,9		
								969	36,6		

Tabla 2. Tiempos de ascenso y longitudes furcales de cada individuo que ascendió la escala.

ANEXO II. Tablas completas del análisis de las imágenes de video

Subidas	Cámara	Desde dónde pasa	Altura de paso respecto al suelo	Cercanía a deflectores en el paso
1	1	ZRP	Fondo	DP
2	1	ZRP	na	na
3	1	ZRP	Fondo	DP
4	1	ZRG	Fondo	DG
5	1	ZRP	Fondo	DP
6	1	ZRG	Medio	DG
7	1	ZRP	Fondo	DP
8	1	ZRP	Fondo	DP
9	1	ZRG	Fondo	Centro
10	1	ZRP	Superficie	DP
11	1	ZRP	Medio	DP
12	1	ZRP	Medio	DP
13	1	ZRG	Medio	DG
14	1	ZRP	Fondo	Centro
15	1	ZRP	Fondo	DP
16	1	ZRP	Medio	DP
17	1	ZRP	Fondo	DP
18	1	ZRP	Fondo	DP
19	1	ZRP	Superficie	DP
20	1	ZRP	Fondo	DP
21	1	ZRP	Superficie	DP
22	1	ZRG	Fondo	DG
23	2	ZRG	Fondo	DP
24	2	ZRG	Fondo	DP
25	2	ZRP	na	na
26	2	ZRP	na	na
27	2	ZRP	Fondo	DP
28	3	ZRP	Fondo	DP
29	3	ZRP	Fondo	Centro
30	3	ZRG	Superficie	DG
31	3	ZRP	Fondo	DP
32	3	ZRP	Fondo	DP
33	3	ZRP	Fondo	DP
34	4	ZRG	Fondo	Centro
35	4	ZRG	Fondo	Centro
36	4	ZRP	Fondo	Centro
37	4	ZRP	Superficie	DP
38	4	ZRG	Fondo	DG
39	4	ZRG	Fondo	DG

Tabla 1. Análisis de los individuos al realizar la subida. Boga del Tajo. Caudal 100 l/s.

Subidas	Cámara	Desde dónde pasa	Altura de paso respecto al suelo	Cercanía a deflectores en el paso
1	1	na	Superficie	na
2	1	ZRG	Fondo	DG
3	1	ZRG	Fondo	DG
4	1	ZRP	Medio	DP
5	1	ZRP	Fondo	Centro
6	1	ZRP	Fondo	DP
7	1	ZRP	Fondo	Centro
8	1	ZRP	Fondo	Centro
9	2	ZRG	Superficie	na
10	2	ZRP	Medio	DP
11	2	na	Superficie	na
12	2	ZRP	Medio	DP
13	3	ZRP	Fondo	DP
14	3	ZRP	Superficie	DP
15	3	ZRP	Medio	DP
16	4	ZRP	Superficie	DP
17	4	ZRP	Medio	DP

Tabla 2. Análisis de los individuos al realizar la subida. Boga del Tajo. Caudal 250 l/s

Subidas	Cámara	Desde dónde pasa	Altura de paso respecto al suelo	Cercanía a deflectores en el paso
1	1	ZRG	Medio	DG
2	1	ZRG	Medio	DG
3	1	ZRG	Medio	DG
4	1	ZRG	Medio	DG
5	1	ZRP	Medio	DP
6	1	ZRG	Fondo	DP
7	1	ZRG	Fondo	na
8	1	ZRP	Fondo	Centro
9	1	ZRP	Medio	DP
10	2	ZRP	Fondo	DG
11	2	ZRP	Fondo	DP
12	3	ZRP	Medio	DP
13	3	ZRP	Medio	DP
14	3	ZRP	Medio	DG
15	3	ZRG	Medio	DP
16	3	ZRP	na	DP
17	4	ZRP	Medio	DP
18	4	ZRG	Medio	Centro
19	4	ZRG	Medio	Centro
20	4	ZRG	Medio	DG
21	4	ZRG	Fondo	DG

Tabla 3. Análisis de los individuos al realizar la subida. Barbo común. Caudal 100 l/s

Subidas	Cámara	Desde dónde pasa	Altura de paso respecto al suelo	Cercanía a deflectores en el paso
1	1	ZRP	Medio	Centro
2	1	ZRG	Fondo	Centro
3	1	ZRP	Medio	Centro
4	1	ZRG	Medio	DG
5	1	ZRP	Fondo	DP
6	1	ZRP	Superficie	DP
7	1	ZRG	Medio	DG
8	1	ZRG	Superficie	DG
9	2	ZRP	Medio	na
10	2	ZRG	Medio	Centro
11	2	ZRG	Medio	DG
12	2	ZRP	Medio	DP
13	2	ZRP	Fondo	Centro
14	3	ZRG	Medio	Centro
15	3	ZRG	Fondo	Centro
16	3	ZRP	Superficie	DP
17	3	ZRP	Medio	Centro
18	3	ZRG	Medio	Centro
19	4	ZRP	Fondo	Centro
20	4	ZRG	Medio	Centro
21	4	ZRG	Fondo	DG
22	4	ZRG	Medio	DG
23	4	ZRG	Medio	DG

Tabla 4. Análisis de los individuos al realizar la subida. Barbo común. Caudal 250 l/s